

змінах моменту опору привідного механізму.

Розроблена модель двигуна постійного струму дає змогу проводити імітаційне моделювання системи керування, напівпровідникового перетворювача та двигуна постійного струму за методом сигнальних графів [4] (або іншим методом), у тому числі в режимі струмів, що перериваються, та в інверторному режимі без ускладнення алгоритму програми автоматизованого розрахунку за рахунок представлення двигуна колом з лінійних елементів.

1.Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / Под ред. О.В.Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

2.Клепиков В.Б., Асмолова Л.В., Обруч И.В. Срывные функциональные автоколебания в электромеханических системах и их устранение // Технічна електродинаміка. – 2007. – №2. – С.35-41.

3.Синчук О.Н., Мельник О.Е. Математическое моделирование добавочных потерь энергии в тяговых двигателях постоянного тока при импульсном регулировании напряжения // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Ч.2. – 2008. – С.130-132.

4.Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем. – Харьков: Вища школа, 1986. – 160 с.

Отримано 17.03.2009

УДК 621.313

М.В.ЧЕРНЯВСКАЯ, М.Л.ГЛЕБОВА, И.Т.КАРПАЛЮК, кандидаты техн. наук
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА

Рассматриваются принципы работы вентильных двигателей. Проанализированы допущения, принятые для конкретной модификации схем включения с целью получения сравнительных характеристик.

Розглядаються принципи роботи вентильних двигунів. Проаналізовано припущення, прийняті до конкретної модифікації схем включення з метою отримання порівняльних характеристик.

The principle of the work of ac electronic motors was considered. The modifications circuit of the ac electronic motors was analyzed. The compare characteristics were got.

Ключевые слова: вентильный двигатель, модульный принцип.

Потребность в электроприводах большой мощности с широким и плавным диапазоном регулирования частоты вращения на современном этапе развития не может быть обеспечена в полной мере за счет традиционных машин постоянного тока (МПТ), где щеточно-коллекторный узел накладывает серьезные ограничения на предельные

значения мощности, частоты вращения, напряжения. В этой связи исследование вентильных двигателей (ВД), которые имеют равноценные с МПТ технические характеристики, но более надежны при меньших эксплуатационных расходах, является актуальной задачей.

Среди значительного количества разнообразных методов анализа процессов в машиновентильных системах большинство базируется на существенных допущениях и построены для той или иной конкретной модификации схем, поэтому определяют лишь качественную картину явлений и не позволяют получить сравнительные характеристики [1]. Следует отметить также недостаток в хорошо апробированных методиках проектирования электрических машин, предназначенных для совместной работы с полупроводниковыми коммутаторами [2]. Последние искажают формы кривых тока и напряжения якорных цепей, приводят к росту потерь, а следовательно, температур активных частей магнитопровода и обмоток, вызывают появление заметных пульсаций электромагнитного момента, являющихся причиной крутильных колебаний валов и увеличения механических нагрузок на отдельные элементы конструкций [3, 4].

Целью данной статьи является разработка математической модели и программного модуля различных модификаций ВД для проведения сравнительного анализа их характеристик и эксплуатационных показателей.

Рассмотрим основной принцип работы системы на примере простейшей схемы вентильного двигателя постоянного тока с естественной коммутацией (рис.1).

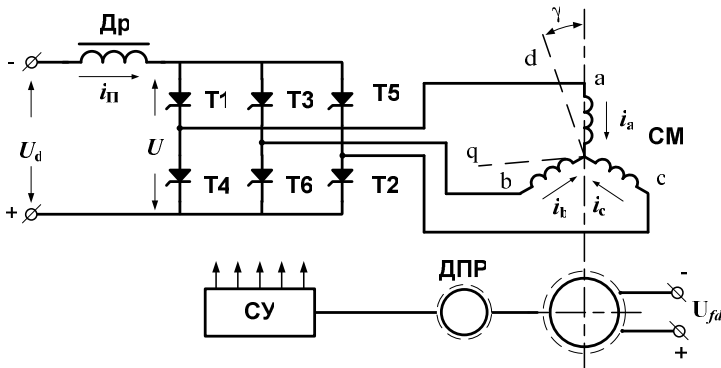


Рис.1 – Принципиальная схема трехфазного ВД постоянного тока

Здесь трехфазная синхронная машина (СМ) получает питание от зависимого инвертора, выполненного на тиристорах (Т1÷Т6), управля-

емых датчиком положения ротора (ДПР). Осциллограмма (рис.2), снятая в установившемся режиме работы экспериментального ВД с базисной мощностью $P_{аб} = 3$ кВт, иллюстрирует этапы работы коммутатора.

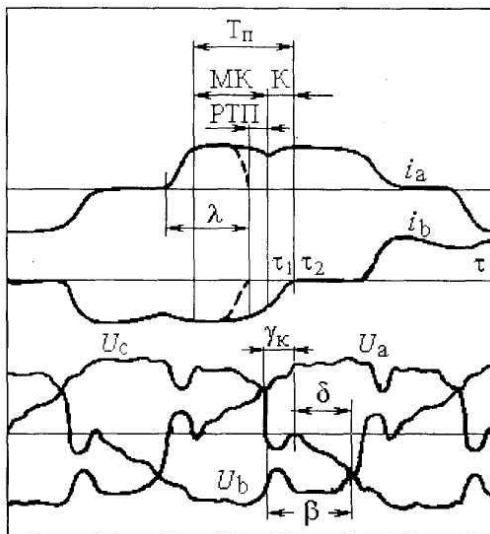


Рис.2 – Осциллограмма токов и напряжений фазных обмоток вентильного двигателя

Пусть, начиная с момента времени $\tau = 0$, тиристоры Т1 и Т6 (рис.1) пропускают ток от фазы "а" к фазе – "b". Результирующее поле якорной обмотки (Φ_a), взаимодействуя с полем индуктора (Φ_r), создает вращающий момент, заставляющий перемещаться ротор в направлении, показанном на рис.3. Если после его поворота на 60 эл. град, ток переключить с фазы "b" на "с", ротор будет продолжать первоначальное движение. Таким образом, при $\tau = \tau_1$ (рис.2) на элемент Т2 следует подать, а с Т6 – снять управляющие сигналы, которые приведут к отпиранию очередного тиристора Т2. Вместе с тем, ток i_b спадает до нуля постепенно.

В течение времени $\tau_1 < \tau < \tau_2$, соответствующему углу коммутации γ_k , благодаря малому сопротивлению вентилей Т2 и Т6 преобразователя в проводящем направлении, фазы "b" и "с" образуют короткозамкнутый контур. При $\tau > \tau_1$ происходит уменьшение i_b за счет ЭДС вращения, которая для успешного завершения коммутации должна быть направлена встречно i_b и согласно i_c .

Это требование обеспечивается выбором угла опережения отпирания тиристоров β_c (или β), регулируемого датчиком положения ротора и отсчитываемого от момента подачи управляющего сигнала на очередной тиристор (Т2) до точки пересечения кривых ЭДС $e_b(\tau)$, $e_c(\tau)$ (или напряжений $U_b(\tau)$, $U_c(\tau)$). При переходе i_b через нулевое значение ($\tau = \tau_2$) сопротивление вентиля Т6 увеличивается на несколько порядков, однако напряжение $U_{ab} = U_a - U_b$, прикладываемое к его силовым зажимам в течение некоторого промежутка времени ($\tau = \delta/\omega$) должно оставаться отрицательным, что необходимо для полного восстановления запирающих свойств элемента. Поэтому величина $\delta = \beta - \gamma_k$ должна превышать минимально допустимый угол запираания δ_m , указанный в каталоге на тиристоры выбранного типа.

В перевозбужденных СМ, особенно при нестационарных режимах, иногда наблюдаются ситуации, отмеченные на рис.2 пунктиром. Здесь длительность протекания тока по фазе оказывается меньше, чем $2\pi/m_{\Pi}$. Кривая тока источника питания $i_{\Pi}(\tau)$ имеет интервалы, в которых $i_{\Pi} = 0$, а ток тиристора отключаемой фазы становится равным нулю до наступления очередной коммутации. С другой стороны, увеличение γ_k может привести к ситуации, когда одновременно оказываются открытыми два вентиля одной фазы противоположных групп. Не рассматривая на данном этапе подобное явление опрокидывания инвертора, равносильное короткому замыканию цепи питания, ограничимся нахождением критериальных условий его возникновения.

Непрерывное вращение ротора может быть обеспечено последовательным подключением фаз синхронной машины к источнику постоянного напряжения согласно схеме (рис.3): ab, ac, bc, ba, ca, cb, ab и т.д., причем работу преобразователя можно характеризовать периодом повторяемости $T_{\Pi} = 2\pi/m_{\Pi}$, в пределах которого выделим режимы: межкоммутационный (МК), коммутационный (К) и прерывистого тока (РПТ).

Особенности работы системы ВД при многофазном ($m > 3$) исполнении обмотки якоря СМ рассмотрим на примере 6-фазного вентильного двигателя (ВД6), обмотка якоря которого выполнена в виде двух групп, оси намагничивающих сил соответствующих фаз которых, сдвинуты в пространстве на 30 эл.град. (рис.4).

Каждая система фаз получает питание от отдельного инвертора, тиристоры которых управляются с помощью датчика положения ротора. В указанном на рис.4 интервале положительный вращающий момент создается при протекании токов от фазы "a1" к "b1" и от фазы "a2" к "b2", т.е. должны быть открыты тиристоры Т11, Т61, Т12 и Т62. Если начало совместной работы тиристоров Т12 и Т62 приравнять ус-

ловию $\tau = 0$, то после поворота ротора на 30 эл.град., для получения оптимального вращающего момента от группы "1", необходимо переключить ток с фазы b1 на c1. В этот момент времени (τ_1) на элемент T21 следует подать, а с T61 – снять управляющие сигналы.

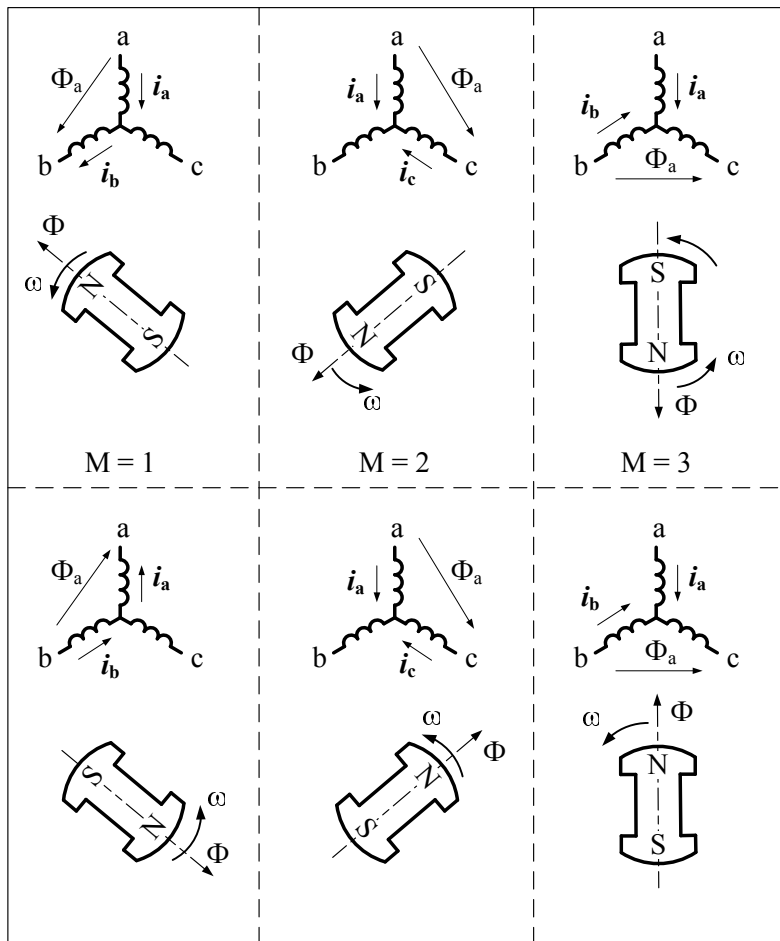


Рис.3 – Последовательность включения фаз вентильного двигателя

В период $(\tau_{1к} - \tau_1)$ (рис.2), соответствующий углу коммутации $\gamma_{к1}$, тиристоры T21 и T61 находятся в проводящем состоянии, а фазы b1 и c1 образуют короткозамкнутый контур. При $\tau = \tau_2$, когда ротор повернется от начального положения ($\tau = 0$) на 60 эл.град. или на 30 эл.град.

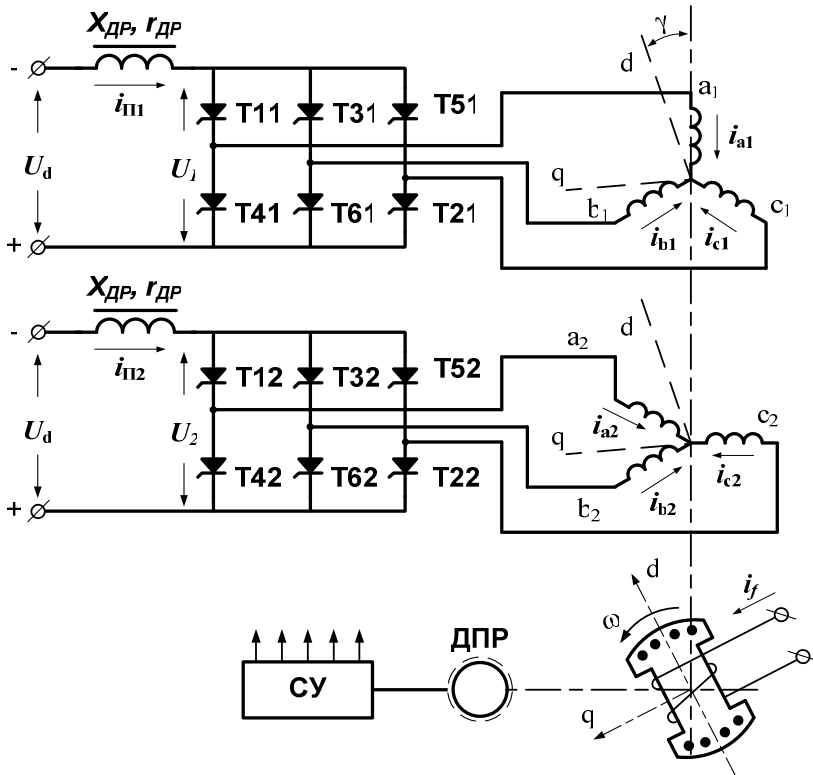


Рис.4 – Принципиальная схема шестифазного ВД постоянного тока

от положения, занимаемого при $\tau = \tau_1$ должен начинаться коммутационный период в группе "2" (подается управляющий сигнал на T22 и снимается с T62). Непрерывное вращение двигателя будет обеспечено за счет следующего порядка подключения фаз синхронной машины к источнику постоянного тока: $a1b1a2b2$; $a1c1a2b2$; $a1c1a2c2$; $b1c1a2c2$; $b1c1b2c2$; $b1a1b2c2$; $c1a1b2c2$ и т.д. При этом работу системы в целом можно характеризовать периодом повторяемости $T = 6\pi/m_{\Pi} \cdot t$, где m_{Π} определяется схемой преобразователя, а m – числом фаз обмотки машины (в рассматриваемом примере $m_u=6$; $m=6$). Для каждого преобразователя, как и в случае ВДЗ, период повторяемости $T = 2\pi/m_{\Pi}$, в пределах которого можно выделить режимы: межкоммутационный (МК), коммутационный (К) и прерывистого тока (РПТ). При питании ВД от источника переменного напряжения (рис.5, а, б)

преобразовательный блок выполняет выпрямительные и инверторные функции. В системе ВД с ЯЗПТ (рис.5, а) как силовые элементы, так и системы управления инвертора и выпрямителя обособлены. При этом их взаимосвязь осуществляется через систему регулирования электропривода (рис.1).

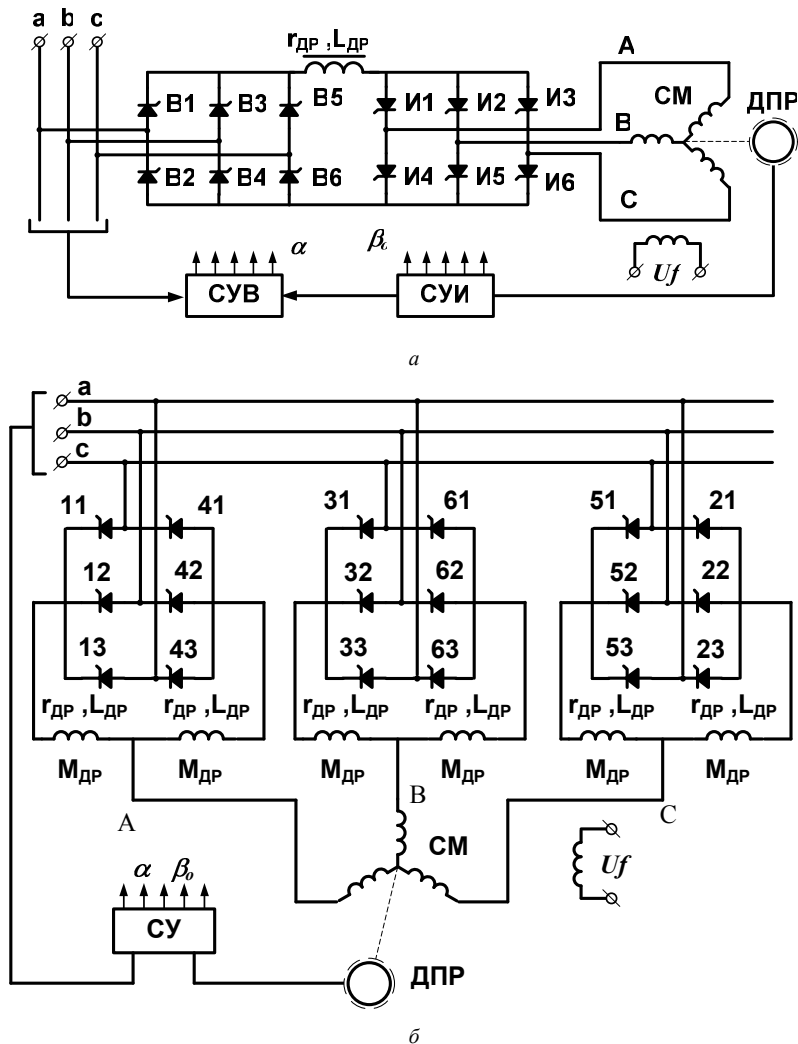


Рис.5 – Принципиальные схемы систем ВД

Покажем особенности работы системы ВД с НПЧ (рис.5, б). Трехфазная синхронная машина (СМ) получает питание от зависимого преобразователя, скомпонованного в виде трех мостовых элементов М1М4, М3М6, М5М2, каждый из которых подключен к источнику переменного напряжения (U_c) и связан с одной из фазных обмоток СМ (А,В,С) через сглаживающие дроссели (Др). Данная схема предполагает естественную коммутацию тиристоров преобразователя, управление которых (СУ) осуществляется с помощью наложения сигналов, поступающих от датчика положения ротора (ДПР - C_m) и источника питания ($U_c - C_c$). Сигналы по этим каналам подаются на группы тиристоров, открытие которых возможно только при наложении сигналов с C_m и C_c , а частота их переключения с одной группы на другую определяется частотой напряжения $U_c(f_c)$ и частотой вращения ротора СМ(f_M). Известно, что непременным условием при применении данной системы ВД является $f_c \gg f_M$.

Рассмотрим два временных интервала в работе ВД, включающих моменты изменения сигналов, поступающих от C_m и C_c . Пусть в момент времени τ_c максимальное положительное значение имеет напряжение U_{ab} (рис.6, а). При этом сигнал на открытие от C_c подается на тиристоры Т11, Т31, Т51, Т42, Т62, Т22. Если при этом положение ротора СМ таково, что для создания электромагнитного момента, совпадающего с направлением вращения машины, необходимо иметь положительный ток в фазе А и отрицательный в фазе В (рис.3 $M=1$), то от C_m сигнал поступает на тиристоры Т11, Т12, Т13, Т61, Т62, Т63. Наложение сигналов от C_m и C_c при $\tau = 0$ имеет место в управляющих цепях тиристоров Т11 и Т62, т.е. эти тиристоры будут открыты в интервале времени $\tau_1 > \tau > \tau_c$ (рис.6). При $\tau = \tau_{15}$, т.е. по истечении времени $\tau_1 - \tau_o = \pi/(3\omega_c)$ (рад.), сигналы от C_c поступают на тиристоры Т43, Т63, Т23, т.е. открыты - Т11, Т62, Т63, начинается коммутация тока с сетевой фазы "b" на фазу "с". Если при этом напряжение U_{bc} положительно, то ток $i_{6,2}$ уменьшается, а $i_{6,3}$ – увеличивается и при $i_{6,2} < 0$ Т62 переходит в закрытое состояние, т.е. его сопротивление резко увеличивается (на рис.6, а время коммутации τ_k не показано). В период $\tau_2 > \tau > \tau_1$ открыты тиристоры Т11, Т63, которые пропускают ток от фазы "а" к фазе "с". Таким образом, заданное напряжение на зажимы СМ (U_{ab}) может быть обеспечено последовательным подключением фаз источника питания: ab, ac, be, ba, ca, cb, ab и т.д. с периодом повторяемости $T_{nc} = 2\pi/\omega_c$.

За время поворота ротора СМ от положения 1 до положения 2 (рис.3) в рабочем (открытом) состоянии находятся тиристоры из групп М1 и М6. Предположим, что к моменту времени x_1 (рис.2) открыты ти-

ристоры T11 и T62. При $\tau = \tau_1$ сигнал от C_m поступает на тиристоры группы M2 (T21, T22, T23) и снимается с группы M6, т.е. с учетом сигнала от C_c открывается тиристор T22. В интервале $\tau_{км} = \tau_2 - \tau_1$, открыты тиристоры T11, T62, T22 и под действием отрицательного напряжения U_{BC} ток в тиристоре T62 уменьшается от $i_{6,2} = |i_b|$ до $i_{6,2} = 0$, а в T22 увеличивается до $i_{22} = |i_c|$. С момента времени x_2 условия работы СМ соответствуют состоянию M=2, т.е. токи в машине протекают по фазам A ($+i_a$) и C ($-i_c$). Через интервал времени $\tau = \pi/(m\omega)$ наступает следующая коммутация фазных токов СМ. Непрерывное вращение ротора обеспечивается последовательным включением тиристорных групп преобразователя, т.е. подачей положительного сетевого напряжения на фазы СМ в последовательности: АВ, АС, ВС, ВА, СА, СВ, АВ и т.д. С позиции переключения фаз СМ, работу преобразователя в системе ВДЗ ($\tau = 3$) можно характеризовать периодом повторяемости $T_{пм} = 2\pi/\rho\omega$.

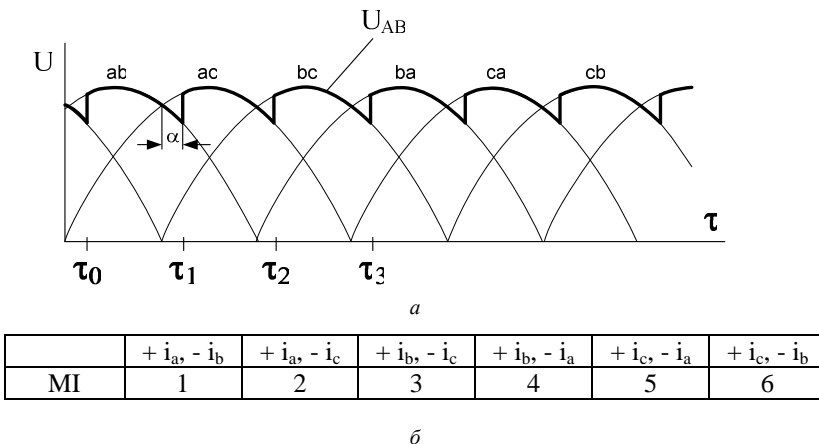


Рис.6 – Диаграмма зависимости напряжения от времени

В целом в работе преобразователя данной системы ВД можно выделить режимы, когда открыты:

- два тиристора в двух группах;
- три (или четыре) тиристора в двух группах;
- три тиристора в трех группах;
- четыре (или пять) тириستоров в трех группах.

Зависимый преобразователь частоты объединяет в общей физической компоновке выпрямительные и инверторные функции. В то же время наличие двух источников управления тиристорами приводит к

некоторой качественной аналогии в работе НПЧ и преобразователя с явно выраженным звеном постоянного тока. Так, в обоих случаях, увеличение угла регулирования (рис.6, *a*), ускоряет процесс коммутации токов (с i_b на i_c).

Таким образом, на коммутацию фазных токов СМ влияет угол опережения поступления сигнала на открытие тиристоров, который отсчитывается от момента подачи управляющего сигнала от ДПР на очередную группу тиристоров (например, М2) до точки пересечения кривых напряжений на выходе преобразователя (U_B , U_C – рис.2).

1. Волчуков Н.П. Сравнительный анализ динамических свойств вентильных электрических машин с различными исполнительными двигателями // Вестник ХГПУ. Вып.11. – Харьков, 1999. – С.174-176.

2. Джура А.В., Лишенко А.И., Лесник В.А., Мозоренко Л.И. Асинхронный вентильный генератор с широтной импульсной моделью выходного напряжения // Техническая электродинамика. Вып.10. Ч.П. – К., 1999. – С.12-17.

3. Гречко Э.Н., Пандаренко И.И. Многоуровневый инвертор напряжения / Техническая электродинамика. Вып.5. Ч.І. – К., 2001. – С.46-50.

4. Бертинов А.И. Специальные электрические машины. – М.: Энергоиздат, 2002. – 552 с.

Получено 29.09.2009

УДК 621.316.722

С.А.ПРИВЕДЕННИЙ

Полтавська філія «Укрсільенергопроект»

ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СІЛЬСЬКИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ

Розглядається метод зниження втрат електроенергії та зниження напруги в сільських розподільчих мережах, використовуючи диференційний облік електроенергії.

Рассматривается метод снижения потерь электроэнергии и снижения напряжения в сельских распределительных сетях, используя дифференциальный учет электроэнергии.

The method of decline of losses of electric power and decline of tension in rural distributive networks on the basis of the use of differential consideration of elektroenergii is examined.

Ключові слова: втрати електроенергії, зниження напруги, облік електроенергії, електрична установка, двотарифна оплата.

Перехід до диференційного обліку електроенергії (ДОО) – це техніко-економічна проблема, рішення якої відповідає інтересам постачальників і споживачів електроенергії. Особливо це актуально для об'єктів агропромислового комплексу (АПК), що мають чимало електричних установок (електросушилки, електронасоси, електротеплові